

УДК 532.66 : 532.528

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВ КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ЗВУКОКАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ

РОЗИНА Е.Ю.

*Одесская государственная академия холода.
65026, Украина, Одесса, ул.Дворянская, д.1-3.*

E-mail: elyur@te.net.ua

Обсуждаются проявления звукокапиллярного эффекта, положенные в основу метода исследования свойств кавитирующей жидкости. Приводятся результаты исследования вязкости и электропроводности жидкостей, подвергнутых локальному кавитационному воздействию.

Обговорюються особливості звукокапілярного ефекту, які покладено в основу методу дослідження властивостей кавітуючої рідини. Приведено результати дослідження в'язкості та електропровідності рідини, що зазнала впливу локальної кавітації.

The peculiarities of the sonocapillary effect, using for the investigation the property of liquid, in which cavitation is excited, are discussed. The experimental result, concerned the local varying of electrical properties and viscosity of cavitating liquid, are presented.

ВВЕДЕНИЕ. При исследовании акустической кавитации, например, динамики кавитационных полостей, основная проблема связана с локализацией кавитационного облака в заданной области ультразвукового поля. Исследование свойств кавитирующей жидкости является еще более сложной экспериментальной задачей, так как возникает необходимость отделить жидкость, подвергнутую воздействию кавитации, от окружающей невозбужденной жидкости. Характерные проявления звукокапиллярного эффекта позволяют рассматривать его как основу принципиально нового метода исследования кавитирующей жидкости. Цель данной работы – показать эффективность звукокапиллярного метода исследования воздействия кавитации на некоторые свойства жидкостей.

1.ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЗВУКОКАПИЛЛЯРНОГО МЕТОДА.

На рис.1 приведена упрощенная схема установки, на которой реализуется звукокапиллярный эффект. Жидкость заполняет ультразвуковую ванну 1 с плоским излучателем 2, на который с генератора 3 подается сигнал частотой $\nu = 18.5$

ν кГц. Над излучателем закреплен капилляр 4, соединенный через стеклянную трубку 5 с компрессором 6 и манометром 7. При повышении напряжения на излучателе можно стимулировать стационарное кавитационное облако с регулируемыми параметрами строго под каналом капилляра (рис.2). Таким образом, проблема локализации кавитационного процесса оказывается разрешимой.

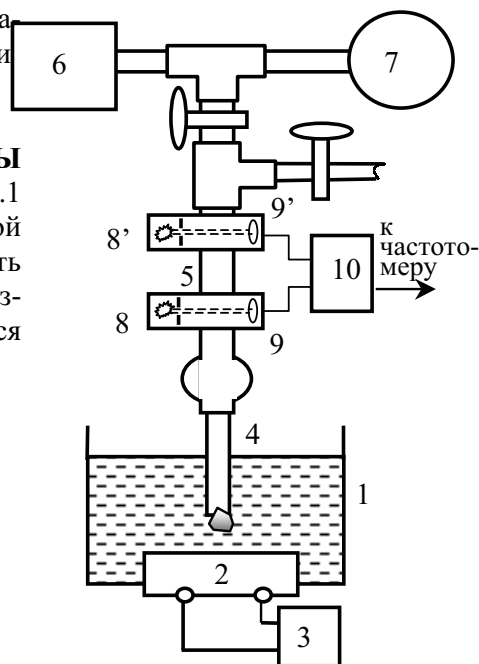


Рис. 1.

Возбуждене кавитации сопровождается формированием стационарного потока жидкости через капилляр. Это означает, что вся жидкость, подвергнутая кавитационному воздействию, не перемешивается с жидкостью, заполняющей ванну, а непрерывно и достаточно быстро отводится по капилляру.

2. ИЗМЕНЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.

Хорошо известны деструктивные свойства кавитационного процесса, что проявляется, в частности, в снижении вязкости η высокомолекулярных жидкостей под действием кавитации [1,2]. Поэтому, естественно, проанализировать применимость ЗК-метода для исследования этого эффекта. В традиционных капиллярных вискозиметрах измерение вязкости базируется на использовании формулы Пуазейля

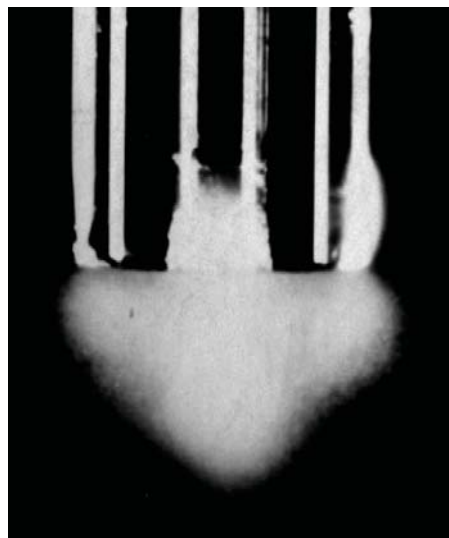


Рис.2

$$v = \Delta P \cdot R_{кан}^2 / 8 \cdot \eta \cdot l_{кан} \quad (1)$$

Для наших условий $\Delta P = P_{зк} - P$, где P - статическое давление в капиллярной системе, создаваемое компрессором, $P_{зк}$ - звукокапиллярное давление, формирующее поток жидкости. Поэтому анализ реологической кривой $v(\Delta P)$ оказывается некорректным, так как $P_{зк}$ определяется как амплитудой переменного давления P_m , так и противодействием P . Если же формулу (1) представить в виде

$$\frac{1}{v} = \frac{8 \cdot \eta}{(P_{зк} - P) \cdot R_{кан}^2} \cdot l_{кан}, \quad (2)$$

то, очевидно, что для заданных условий график зависимости $1/v = f(l_{кан})$ должен быть линейным, если вязкость жидкости не изменяется или слабо изменяется под действием кавитации. Поэтому в предположении, что длина капилляра $l_{кан}$ не влияет на $P_{зк}$, измеряли скорость звукокапиллярного потока жидкости v в капиллярах разной длины.

В экспериментах определялось время заполнения объема трубки 5, между закрепленными на ней парами источник света - фотодиод 8-9 и 8'-9'. При прохождении мениска сфокусированные лучи попадают на фотодиоды; электрические сигналы, преобразованные блоком 10 в последовательность импульсов, подаются на вход частотомера, работающего в режиме измерения интервалов времени. Изменяя объемную скорость заполнения измерительной трубки и, зная соотношение диаметров капилляра и измерительной трубки, определялась средняя скорость потока жидкости v через капилляр.

Исследовали воздействие кавитации на вязкость растворов глицерина в воде разной концентрации с начальной вязкостью η_0 равной $16.8 \cdot 10^{-3}$, $23.6 \cdot 10^{-3}$, $4.9 \cdot 10^{-3}$ Па·с и раствора касторового масла в дибутилфталате (ДБФ) $\eta_0 = 69 \cdot 10^{-3}$ Па·с. В работе использовали капилляры с внутренним диаметром $d_{кан} = (0.3 \div 0.7)$ мм и длиной, превышающей 1.5 см. При таких условиях число Рейнольдса порядка единицы. Длина δ входного конца капил-

ляра, на котором формируется Пуазейлевский профиль течения, составляет $\delta \sim Re \cdot R_{кан}$ [3]. Для наших условий $\delta \sim 0.5$ мм, то есть значительно меньше самого короткого из использованных капилляров, поэтому формула Пуазейля применима, и следствий из нее является корректным.

Для капилляров различной длины снимали зависимости $v(P)$; компенсационным методом измеряли $P_{зк}$; по значениям скорости, для которых $\Delta P = P_{зк} - P$ мало отличается, строили зависимости $1/v = f(l_{кан})$. Полученные зависимости явно нелинейны, и их графическим дифференцированием для каждой жидкости кривые изменения вязкости вдоль канала капилляра $\eta(l_{кан})$ (рис.3). Кривые 1,2 соответствуют растворам глицерина в воде, 3 - касторового масла в ДБФ, пунктиром показаны значения η_0 . (Первичные результаты и методика их обработки детально описаны в работе [4]). Ход кривых $\eta(l_{кан})$ свидетельствует о снижении вязкости исследованного раствора именно в области кавитационного возбуждения жидкости. Как видно, вязкость растворов глицерина уменьшаются в несколько раз, вязкость раствора масла в ДБФ – на порядок. При удалении от области кавитации вязкость всех жидкостей увеличивается и приближается к значению η_0 .

Таким образом, при использовании ЗК-метода исследуемый процесс естественным образом распадается на две последовательные стадии: I - уменьшение вязкости жидкости на протяжении времени ее протекания через кавитационно-возмущенную область, II – частичная релаксация вязкости к начальному значению при протекании в капилляре и удалении от области воздействия. По экспериментальным значениям скорости потока, были определены характерные времена для обоих составляющих процесса. Длина зоны кавитации не превышает 5 мм (см. рис.2). Каждый объем жидкости, движущейся со средней скоростью 0.4-0.02 м/с, находится под воздействием кавитации время $\tau_k \sim 0.2$ с. Это значение получено для раствора касторового масла в

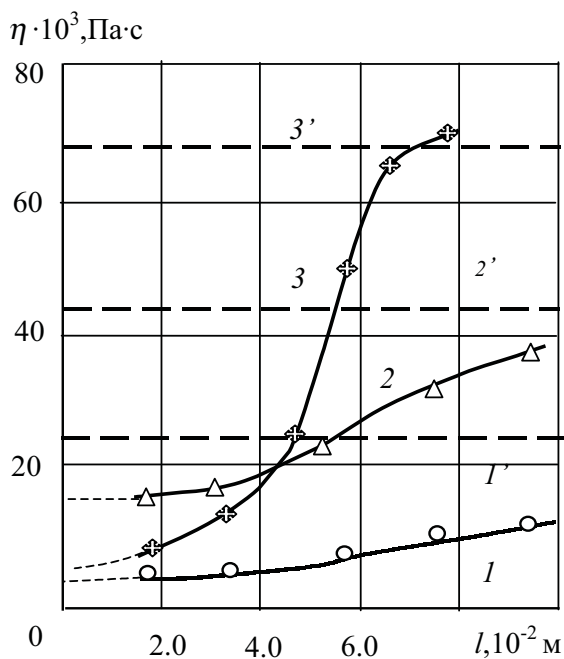


Рис.3.

ДБФ; скорость растворов глицерина выше, поэтому для них параметр τ_k еще меньший. Время релаксации τ_p вязкости к начальному значению для раствора касторового масла в ДБФ может быть определено непосредственно по рис.4, и составляет 0.75 с, в случае водных растворов глицерина этот параметр превышает 3 с.

Не анализируя в данной работе молекулярную природу исследованных зависимостей, отметим явные преимущества использованного метода, по сравнению с методом, описанным в работах [1,2]. В обеих работах ультразвуковые колебания возбуждают в объеме жидкости, не меньшем чем 200 см^3 . Объем жидкости, охваченной кавитационным процессом, реально не превышает $0.2-0.5 \text{ см}^3$. Причем, жидкость, которая испытала воздействие кавитации и изменила свойства, непрерывно перемешивается с окружающей невозмущенной жидкостью. Для того, чтобы в процентном отношении увеличить концен-

трацию жидкости, прошедшей кавитационную обработку, процесс длится десятки минут; после этого вязкость жидкости определяется вискозиметром. Характерно, что даже такое продолжительное ультразвуковое воздействие позволило зарегистрировать снижение вязкости не более чем на 25-30 процентов от его первоначального значения. Очевидно, что такая методика позволяет зарегистрировать только остаточные эффекты, поэтому снижение вязкости было зарегистрировано только для высокомолекулярных соединений, в которых происходят необратимые разрушения макромолекул и соответствующее уменьшение средней молекулярной массы растворенного вещества.

В ЗК-методе имеется возможность регистрировать быстрые обратимые процессы: и значительное снижение вязкости в зоне кавитации и последующую ее релаксацию к начальному значению. Заметим, что воздействие кавитации на раствор сахарозы (высокомолекулярное соединение) показало устойчивое снижение вязкости и отсутствие релаксации. Таким образом, ЗК- метод является более информативным и позволяет существенно расширить класс жидкостей, в которых наблюдается влияние кавитации на вязкость.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАВИТАЦИОННО ВОЗБУЖДЕННОЙ ЖИДКОСТИ. Протекание таких процессов как сонолюминесценция и звукохимические реакции свидетельствует о том, что в кавитационной области происходит образование свободных радикалов, что может повлиять на электрические свойства кавитационно - возбужденного объема жидкости.

Наиболее распространенным методом исследования электропроводности (или удельного сопротивления) среды является анализ вольтамперных характеристик. По зависимостям $I(U)$ методом графического дифференцирования можно определить дифференциальное сопротивление $R_{\delta} = dU/dI$ зазора между электродами, в котором локализовано кавитационное облако. Очевидно, что это сопротивление не является однозначной характеристикой кавитационно-возбужденной среды, и необходимо определить удельное сопротивление указанного промежутка. Для цилиндрического проводника с длиной l и сечением S удельное сопротивление ρ может быть определено из соотношения $R_{\delta} = \rho \cdot l/S$. Как видно из рис.2, форма кавитационного облака, возбужденного под срезом одиночного капилляра, далека от правильной, поэтому использовать указанное соотношение нельзя.

В разделах 1,2 обращено внимание на широко известные проявления ЗКЭ. Реже об-

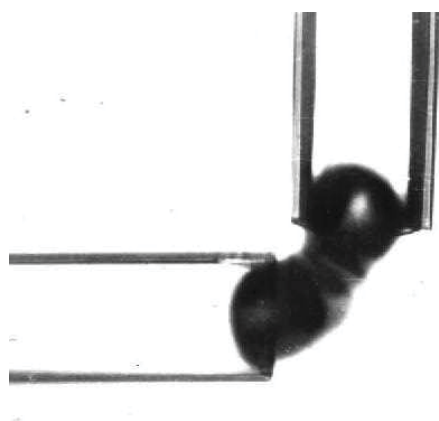


Рис.4

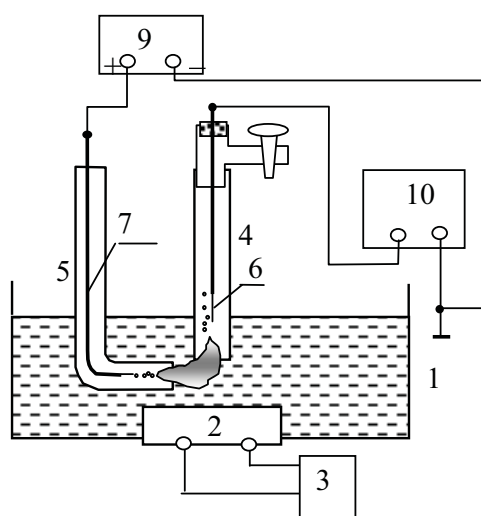


Рис.5

суждается не менее важное свойство: величина $P_{зк}$ не зависит от ориентации среза капилляра относительно излучателя [5], что характерно для докавитационного и кавитационного режимов. Как следствие, при расположении двух капилляров над поверхностью излучателя оба оказываются равноправными независимо от ориентации их срезов над поверхностью излучателя. Поэтому использование двух капилляров позволяет деформировать область, охваченную предкавитационным или кавитационным процессом. На рис.4 приведена фотография пульсирующего пузырька воздуха, зафиксированного между двумя капиллярами в дистиллированной воде. Как видно, оба капилляра одинаково действуют на газовую полость, втягивая ее в свои каналы. При этом форму полости можно приближенно рассматривать как цилиндрическую. Таким же деформированным, «растянутым» между двумя капиллярами, оказывается и кавитационное облако.

В установке для исследования электрических свойств кавитационно возбужденной жидкости (см. рис.5), кроме вертикально расположенного капилляра 4 над излучателем 2 установлен изогнутый под прямым углом капилляр 5. Внутри капилляров размещены медные электроды 6 и 7, подключенные к источнику постоянного напряжения 9 и измерителю токов 10. На такой установке была реализована описанная выше методика для жидкостей, существенно отличающихся по своим молекулярным свойствам. Результаты, полученные для воды и водных растворов, по-видимому, характеризуют разрушение двойного электрического слоя на границе металл – жидкость и изменение характера электродных процессов, а не электрических свойств жидкости в области кавитации.

Показательными являются результаты, полученные для силиконовой жидкости. На рис.6 приведена зависимость удельного сопротивления ρ жидкости в зазоре между капиллярами от напряжения на излучателе. При возбуждении кавитации в зазоре происходит резкое (на три порядка) падение удельного сопротивления [6]. При дальнейшем увеличении $U_{изл}$ продолжается медленный спад параметра ρ , и проявляется влияние напряжения между электродами U в диапазоне значений (0.8-1.4 кВ), далеко от пробивного напряжения для этой жидкости. Кривые рис.6 получены при $U = 400$ В (1); 800 В (2); 1200 В (3). Исследованный эффект требует дальнейшего детального исследования, однако подчеркнем, что до настоящего времени прямых измерений электрических параметров кавитирующей среды не проводилось.

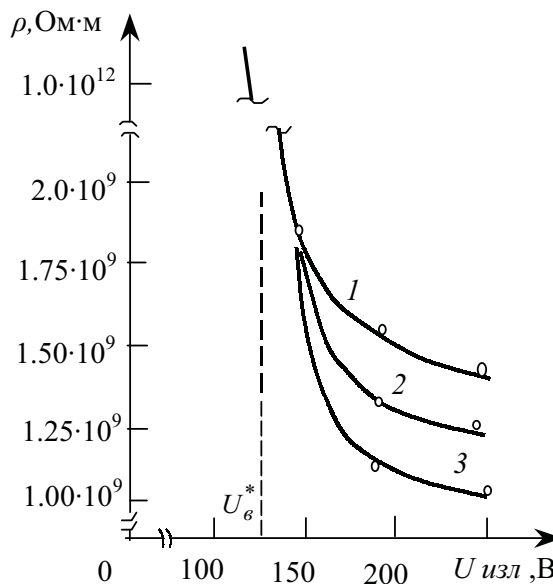


Рис.6.

4. О СКОРОСТИ ЗВУКА В КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ. В жидкости, содержащей газовые пузырьки, скорость звука значительно меньше, чем в сплошной жидкости, и экспериментально зарегистрированные значения могут составлять 50 м/с [7,8]. Причина в том, что сжимаемость такой среды определяется высокой сжимаемостью газа, а плотность определяется достаточно высокой плотностью жидкости. При кавитации сама постановка вопроса о скорости звука в кавитирующей среде c_k является дискуссионной. Тем не менее, вопрос этот возникает при рассмотрении волнового сопротивления $\rho \cdot c_k$

кавитирующих жидкостей [9, с.241], и для величины c_k приводятся значения 10-12 м/с [10, с.158].

Результаты исследования ЗК-потока жидкости позволяют подойти к этому вопросу с другой стороны. По описанной в разделах 1,2 методике можно определить зависимость скорости потока v от приложенного противодействия P . Произведение этих величин $J_n = P \cdot v$ характеризу-

ет мощность потока, то есть энергию, переносимую жидкостью за единицу времени через единицу сечения капилляра. Формирование потока обусловлено периодическим направленным смещением кавитирующей среды в канал капилляра [11]. Поэтому естественно считать, что величина J_n не превышает плотность потока акустической энергии в кавитирующей среде J_k , причем, при малых противодействиях $J_k \approx J_n$. Плотность энергии потока $\omega_n = \rho \cdot v^2 / 2$ из тех же соображений не может превышать плотности акустической энергии в кавитирующей среде ω_k , и $\omega_k \approx \omega_n$. Скорость звука связана с энергетическими характеристиками ультразвукового поля $c = J/W$. Применяя формально это соотношение для параметров, характеризующих кавитирующую среду, вычислим $c_k = J_k / \omega_k \approx J_n / \omega_n$. Результаты представлены в таблице, и, как видно, сопоставимы со значениями, приведенными в работе [10].

Таблица 1

$d_{кан}$ мм	P , 10^4 Па	v , м/с	J_n , Вт/м ²	ω_n , Дж/м ³	c_k , м/с
0.34	0.4	1.25	$0.5 \cdot 10^4$	$0.78 \cdot 10^3$	6.67
	1.6	1.0	$1.6 \cdot 10^4$	$0.5 \cdot 10^3$	32.0
0.50	0.5	2.5	$1.25 \cdot 10^4$	$3.15 \cdot 10^3$	3.97
	1.0	2.0	$2.00 \cdot 10^4$	$1.62 \cdot 10^3$	12.4
0.70	0.4	2.0	$0.8 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^3$	4.0
	0.8	1.7	$1.36 \cdot 10^4$	$1.44 \cdot 10^3$	9.44

ЛИТЕРАТУРА

- Архангельский М.Е., Сергеева К.Я. О роли ультразвуковой кавитации в снижении вязкости гидравлических жидкостей // Акуст. журн. – 1964. – Т.10, №2. – С.111 – 112.
- Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико – химическое и биологическое действие. – М.: Гос. из-во физ. – мат. лит.- 1963.- 420 с.
- Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика.-М.:Физматгиз, 1959.-700 с.
- Розіна О.Ю. До питання про зміну властивостей рідини внаслідок збудження кавітаційного процесу // Укр.фіз.журн.- 2003.- Т.48 (в печати).
- Розин Ю.П., Тихонова В.С. О давлении, возникающем у мениска в капилляре в ультразвуковом поле // Сб. тр. VI Всес. Акуст. конф., Москва, 1968 г.- сер.БVIб.
- Розіна О.Ю. Локальна зміна електричних властивостей рідини в ультразвуковому полі// Укр.фіз.журн.- 2002.- Т.47, №2.- С.160-166.
- Бэтчелор Г.К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости// Механика: сб. переводов иностранных статей.- 1968.- Т.3(109).- С.65-89.
- Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах.- Новосибирск, из-во ИТФ АН СССР.- 1983.- 237 с.
- Розенберг Л.Д. Кавитационная область// Мощные ультразвуковые поля, под ред. Л.Д.Розенберга.- М.:Наука, 1968.- С.223-265.
- Красильников В.А., Крылов В. Введение в физическую акустику.-М:Наука.-1984.- 400с
- Розіна Е.Ю. Кавитационный режим звукокапиллярного эффекта// Акуст. вісн.- 2003.- Т.6, №1 (в печати)